

基于 MUSIC 算法的空间谱估计技术在 TD-LTE 上行定时中的应用

董元亮¹, 黄联芬¹, 周春晖²

(1.厦门大学 信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005; 2.清华大学 无线与移动通信技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 空间谱估计算法因其在参数估计方面具有分辨性能高、稳健性好等优点被广泛应用。为提高 TD-LTE 低信噪比时定时的准确度, 提出一种基于空间谱估计的定时偏移估计算法, 利用 TD-LTE 上行特殊的导频结构, 构造出与空间谱估计相类似的模型, 利用 MUSIC 算法进行定时偏移估计。仿真结果表明, 即使在信噪比很低的情况下, 基于 MUSIC 的定时偏移估计算法的估计性能依然很好。与传统的算法相比, 存在多径的情况下, 基于空间谱估计技术的定时准确度大大提高。

关键词: MUSIC; 定时; 谱估计; TD-LTE

中图分类号: TN929.53-34

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2013)07-0023-03

Application of space spectrum estimation technique based on MUSIC algorithm in TD-LTE uplink timing

DONG Yuan-liang¹, HUANG Lian-fen¹, ZHOU Chun-hui²

(1. Department of Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Wireless and Mobile Communication Technology Research Center of Tsinghua University, Beijing 100083, China)

Abstract: The spatial spectrum estimation algorithm was widely used at the aspect of the parameter estimation because of its many advantages such as higher resolution, greater robustness and so on. In order to improve the timing accuracy at low signal-to-noise ratio (SNR) of TD-LTE, a kind of timing offset estimation algorithm based on the spatial spectral estimation was presented. By the special pilot structure of TD-LTE uplink, a model which is similar to spatial spectrum estimation can be built and then use MUSIC algorithm to get the timing offset estimation. The simulations reveal that, the estimation performance is very good even in the case of low signal-to-noise ratio. Compared with the traditional algorithm, the timing accuracy will greatly improve when use a technology which is based on spatial spectral estimation algorithm.

Keywords: MUSIC; timing; spectrum estimation; TD-LTE

0 引言

TD-LTE 一经提出就受到了各国的重视, 各国都投入了大量的人力财力, 共同推动着 TD-LTE 的发展。在 TD-LTE 中, 为了避免过高的峰均比, 上行采用 SC-FDMA 技术^[1]。SC-FDMA 技术首先将数据进行 DFT 变换, 再补零进行子载波映射, 然后进行 IFFT 变换得到时域信号。上行的解调参考信号 (Demodulation Reference

Signal, DMRS) 不经过 DFT 变换而直接进行子载波映射。同 OFDM 技术一样, SC-FDMA 也采用循环前缀作为保护间隔。TD-LTE 上行会面临同步的问题, 不同步就会对频域数据带来相位的旋转^[2-3], 如果不能准确的估计并纠正, 会对后续信号处理产生很大的影响^[4]。

近年来出现不少关于 TD-LTE 上行定时偏移估计的算法^[5-9], 文献[9]中提出一种基于相位差分的算法。在单径情况下, 此算法在高信噪比时有较好的估计性能, 但是在多径或者信噪比很低时, 同文献[5-8]中一样, 估计性能很差。本文提出一种基于 MUSIC 算法空间谱估计的定时估计算法, 利用空间谱估计技术的高分辨性能、高稳健性对 TD-LTE 上行定时偏移进行估计。在多径情况下, 该算法在信噪比较低的情况下仍然呈现很好的估计性能, 特别适合对定时要求特别高的地方。虽然 MUSIC 算法的分辨率高、稳定性好, 但是该算法需要进

收稿日期: 2012-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61201192); 基于时频域耦合的分布式 MIMO 信道建模; 重大专项项目(2012ZX03003007-004)支持; 基带集中处理的 RAN 构架研究; 973 项目(2012CB316000); 无线移动通信国家重点实验室(电信科学技术研究院)合作项目(20122000153); 认知无线电中的动态频谱分配技术研究

行谱峰搜索,运算量很大。但是在TD-LTE上行中,其整数倍定时偏移不会超过循环前缀的长度,而且小数倍偏移不会超过半个子载波,针对此情况,可以将整数倍偏移与小数倍偏移分开估计,先估计整数倍偏移,对数据进行补偿后,再估计小数倍偏移,这样就可以大大降低运算量,而且分辨率很高。

1 MUSIC算法的空间谱估计模型

假设空间有 p 个信号源 $x_i(n)$,现用一有 m 个阵元的等距线阵对这 p 个信号进行接收^[10],等距线阵如图1所示。

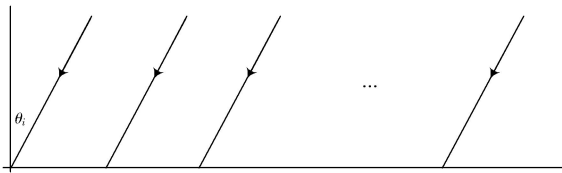


图1 等距线阵

阵元1为参考阵元,信号 $x_i(n)$ 到达第 k 个阵元上与到达参考阵元之间的相位差为:

$$(k-1)\omega_i = 2\pi \frac{d}{\lambda} (k-1) \sin \theta_i, \quad k=2,3,\dots,m; i=1,2,\dots,p \quad (1)$$

式中: ω_i 为第二个阵元相对于参考阵元引起的相位差; λ 为信号波长; θ_i 为波达方向; d 为阵元间距。

则在第 k 个阵元上接收到的信号 $y_k(n)$ 为:

$$y_k(n) = \sum_{i=1}^p x_i(n) e^{-j(k-1)\omega_i} + w_k(n), \quad k=1,2,\dots,m \quad (2)$$

式中 $w_k(n)$ 表示第 k 个阵元上的噪声。式(2)写成向量的形式为:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{A}(\omega) \mathbf{x}(n) + \mathbf{w}(n) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{y}(n) = [y_1(n), y_2(n), \dots, y_m(n)]^T$ 为阵元输出向量; $\mathbf{A}(\omega) = [\mathbf{a}(\omega_1), \mathbf{a}(\omega_2), \dots, \mathbf{a}(\omega_p)]$, 其中 $\mathbf{a}(\omega) = [1, e^{-j\omega}, e^{-j2\omega}, \dots, e^{-j(m-1)\omega}]^T$ 为导向向量; $\mathbf{x}(n) = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_p(n)]^T$ 为信号向量; $\mathbf{w}(n) = [w_1(n), w_2(n), \dots, w_m(n)]^T$ 为噪声向量,上标“T”表示转置。

对向量 $\mathbf{y}(n)$ 求协方差矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{yy} &= E\{\mathbf{y}(n)\mathbf{y}^H(n)\} \\ &= \mathbf{A}(\omega) E\{\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n)\} \mathbf{A}^H(\omega) + \sigma^2 \mathbf{I} \\ &= \mathbf{A} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{A}^H + \sigma^2 \mathbf{I} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: \mathbf{R}_{xx} 为信号的协方差矩阵; σ^2 为噪声方差;对 \mathbf{R}_{yy} 进行特征值分解^[11]:

$$\mathbf{R}_{yy} = \mathbf{U}_s \mathbf{\Sigma}_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_N \mathbf{\Sigma}_N \mathbf{U}_N^H \quad (5)$$

式中: \mathbf{U}_s 为大特征值对应的信号子空间; \mathbf{U}_N 为小特征值

对应的噪声子空间; $\mathbf{\Sigma}_s, \mathbf{\Sigma}_N$ 分别为大小特征值对应的对角阵。

利用导向矢量与噪声子空间的正交关系,空间谱估计公式可表示为:

$$p(\omega) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\omega)(\mathbf{I} - \mathbf{U}_s \mathbf{U}_s^H) \mathbf{a}(\omega)} \quad (6)$$

然后将 ω 划分成若干个等间距的单位,进行谱峰搜索,估计波达方向 θ_i 。

2 定时偏移估计

TD-LTE上行采用SC-FDMA技术^[1],其传输结构如图2所示。

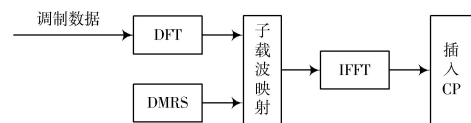


图2 TD-LTE上行传输结构

如果存在定时偏移 Δt 时,令归一化定时偏移 $\tau = \Delta t/T_s, T_s$ 为抽样周期,接收端将接收到的数据进行FFT变换后可表示为^[9]:

$$Y_i(k) = \exp(-j2\pi\tau k/N) X_i(k) + W_i(k), \quad k=0,1,\dots,N \quad (7)$$

式中: N 为FFT点数; W_i 表示FFT($w(n)$); $w(n)$ 表示噪声。

为了利用MUSIC算法进行定时偏移估计,需要构造出与空间谱估计类似的模型,下面用DMRS信号构造与空间谱估计类似的数学模型,若式(7)表示为接收到的DMRS信号,则 $X_i(k)$ 在接收端已知,令式(7)两边同除以 $X_i(k)$ 得到下式:

$$H_i(k) = Y_i(k)/X_i(k) = \exp(-j2\pi\tau k/N) + W_i'(k) \quad (8)$$

式中 $W_i'(k) = W_i(k)/X_i(k)$,比较式(3)与式(8)可以发现,两者具有相似的数学模型,则可以利用MUSIC算法对定时偏移进行估计。

下面给出算法的具体步骤:

步骤一:将接收到的数据进行FFT变换,从变换后的数据中提取DMRS信号,与本地已知的参考信号做共轭相乘,得到数据 (S_1, S_2, \dots, S_L) ;

步骤二:利用如下式(9)计算协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{ss}$,对 $\hat{\mathbf{R}}_{ss}$ 进行特征值分解,得到信号子空间 \mathbf{U}_s 与噪声子空间 \mathbf{U}_N ;

$$\hat{\mathbf{R}}_{ss} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L S_i S_i^H \quad (9)$$

步骤三:设置 $\omega_i = (i-1) \cdot 2\pi \cdot \Delta$,其中 Δ 表示相位差 ω 的划分间隔,总的搜索点数 n ,利用式(6)进行谱峰搜索,找出谱峰所对应的 i ;

步骤四:求出整数倍偏移 $\tau_{im} = \text{round}(i \cdot \Delta \cdot N)$;

步骤五:利用求出的 τ_{int} 对数据 (S_1, S_2, \dots, S_L) 进行补偿,重复步骤二、三,利用得到的 i 求出小数倍偏移 $\tau_{\text{frac}} = i \cdot \Delta \cdot N$,在进行小数倍偏移估计时,需对相位差 ω 重新进行划分间隔以提高分辨率,搜索点数也要进行重新设置。最后得到定时偏移 $\tau = \tau_{\text{int}} + \tau_{\text{frac}}$ 。

3 仿真分析

针对本文提出的算法进行性能分析,TD-LTE 上行基本参数设置见表 1。

表 1 TD-LTE 上行基本参数	
参数	参数值
带宽	20 MHz
用户数	1
信道类型	PedA/AWGN
资源分配	100 RBs
发射模型	1×1

定时偏移为 45.24 个采样点,整数倍估计计划分间隔 $\Delta = 1\text{e} - 4$,小数倍估计计划分间隔 $\Delta = 1\text{e} - 7$,仿真长度为 500 个子帧,仿真结果如图 3~图 6 所示。

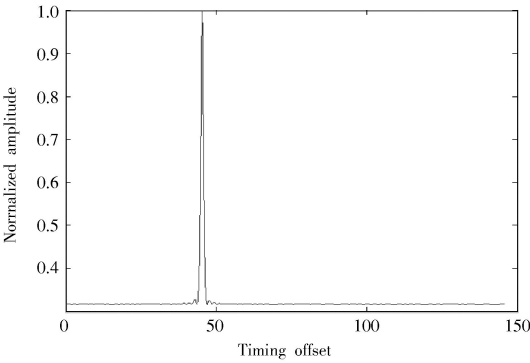


图 3 SNR=0 时 MUSIC 算法空间谱

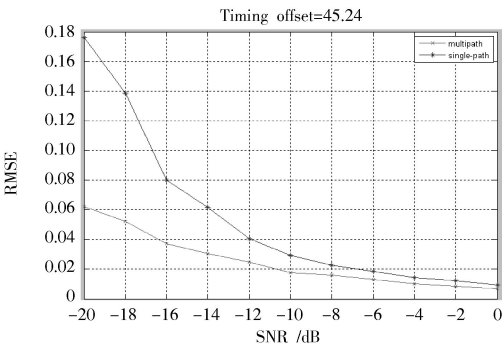


图 4 MUSIC 算法性能曲线

从图 3 可以看出,在信噪比为 0 dB 时,在定时偏移处出现一谱峰,而且谱峰很尖锐,说明该算法的性能好、稳定性很高。图 4 中纵坐标为根均方误差,从图 4 可以

看出,无论是单径还是多径,在信噪比很低的情况下,基于 MUSIC 算法的谱估计技术仍然能够很好地估计出 TD-LTE 上行定时偏移。

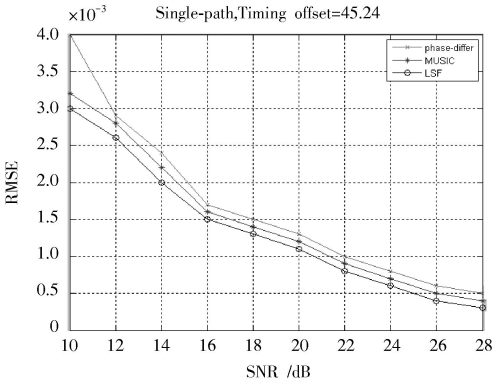


图 5 单径情况下,三种算法的估计性能比较

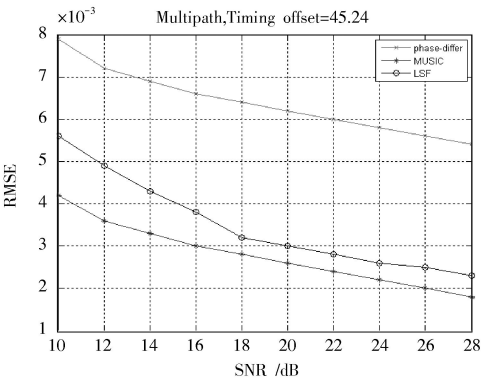


图 6 多径情况下,三种算法的估计性能比较

定时偏移为 45.24 个采样点时,在理想信道下,由划分间隔 Δ 可计算定时偏移的最小误差为 $2.56\text{e} - 5$ 。从图 5 可以看出,在单径情况下,基于相位差分算法性能最差, MUSIC 算法次之,基于最小二乘曲线拟合算法性能最好。在单径情况下,基于最小二乘曲线拟合算法是在最小均方误差下的最优解。从图 6 可以看出,在多径情况下,基于 MUSIC 算法的性能与其他两种算法差异明显,算法的性能依然很好,估计的准确度很高。

4 结 论

TD-LTE 系统上行对定时很敏感,需要正确地估计并纠正。本文提出一种基于 MUSIC 算法的的定时偏移估计,算法的抗多径能力强,稳定性高,能够满足需求。基于 MUSIC 算法的谱估计技术需要进行特征值分解以及谱峰搜索,运算量大。但是针对特殊场合,只要合理的划分相位差 ω ,就可使算法具有较高的分辨率同时又能使运算量大大降低。

注:本文通信作者为黄联芬。

(下转第 28 页)

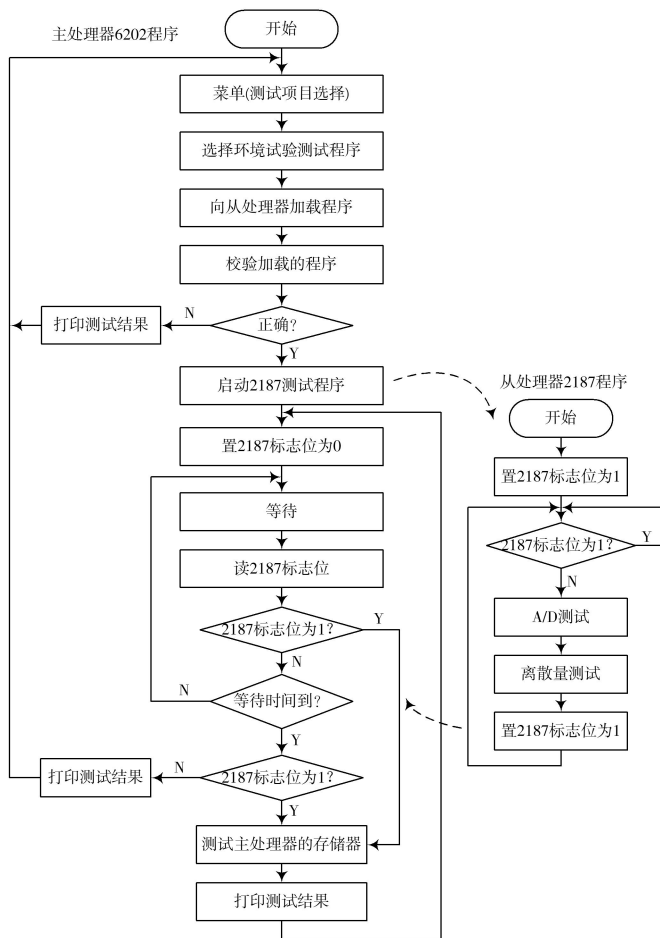


图4 BIT软件流程图

设备驱动是导信息数据处理系统的接口设备驱动

软件,这些设备主要包括 RS 232, A/D, D/A, 离散量输入、离散量输出等。

4 结 论

通过主、从 DSP 芯片处理应用于红外制导控制信息数据处理系统上大大提高了硬件的集成度和灵活性,调试方便、便于系统硬件中故障的定位。主、从 DSP 的红外制导控制信息数据处理系统硬件设计方案,弥补了单个 DSP 不能完成多项数字功能处理的缺点,使系统功能划分更为合理,便于系统进行扩展。

参 考 文 献

- [1] 史震,赵世军.导弹制导与控制原理[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2002.
- [2] 于凤芹.TMS320 C6000 DSP 结构原理与硬件设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [3] TI. TMS320C6202B 元器件手册[M].USA:TI Corporation,2011.
- [4] AD. ADSP-2187NBST-320 元器件手册[M].USA:AD Corporation,2010.
- [5] 舒金龙.末制导炮弹的研究现状及发展趋势[J].系统工程与电子技术,2003,25(4):443-446.
- [6] 江思敏,刘畅.TMS320C6000 DSP 应用开发教程[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [7] 张一,张合新,黄金峰,等.基于 INS/LAS 组合末制导方法研究与仿真[J].现代电子技术,2010,33(19):50-53.
- [8] 杨萍.基于 TMS320F2812 的某型光电跟踪平台控制电路设计[J].现代电子技术,2012,35(4):185-187.

(上接第 25 页)

参 考 文 献

- [1] 王映民,孙韶辉.TD-LTE 技术原理与系统设计[M].北京:人民邮电出版社,2010.
- [2] 付霞,何忠秋,张宁炜.定时和频率偏差对 OFDM 系统性能影响[J].信息技术,2008(4):145-147.
- [3] MYUNG H G, LIM J, GOODMAN D J. Single carrier FDMA for uplink wireless transmission [J]. IEEE Vehicular Technology Mag., 2006, 1(3): 30-38.
- [4] RAGHUNATHAN K, CHOCKALINGAM A. SC-FDMA versus OFDMA: sensitivity to large carrier frequency and timing offsets on the uplink [C]// 2009 IEEE Global Telecommunications Conference. Honolulu: IEEE, 2009: 1-6.
- [5] FILIPPI A, SERBETLI S. OFDM symbol synchronization using frequency domain pilots in time domain [J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2009, 8(6): 3240-3248.
- [6] KUNG T L, PARHI K K. Optimized joint timing synchroniza-

- tion and channel estimation for OFDM Systems [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2012, 1(3): 149-152.
- [7] MICHELE M. Timing and frequency synchronization for the uplink of an OFDM system [J]. IEEE Trans. on Communications, 2004, 52(2): 296-306.
- [8] CHEEMA M I, KHAN S A. A low complexity fine timing offset and channel estimation algorithm for cooperative diversity OFDM system [C]// 2011 International Conference on Communications and Information Technology. Aqaba: IEEE, 2011, 3: 147-151.
- [9] LIU J, WU B, PINGAN L. On timing offset and frequency offset estimation in LTE uplink [J]. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, 2012, 72: 256-274.
- [10] 张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [11] 王永良,陈辉,彭应宁,等.空间谱估计理论与算法[M].北京:清华大学出版社,2004.

作者简介:董元亮 男,1985年出生,安徽亳州人,硕士研究生。主要研究方向为无线通信。